

doi:10.11676/qxxb2019.043

气象学报

多源气象数据融合格点分析产品研制进展

师春香¹ 潘旸 谷军霞 徐宾 姜志伟 韩帅 朱智 张雷 孙帅

SHI Chunxiang PAN Yang GU Junxia XU Bin JIANG Zhiwei HAN Shuai

ZHU Zhi ZHANG Lei SUN Shuai

国家气象信息中心, 北京, 100081

National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China

2018-06-27 收稿, 2019-01-08 改回

师春香, 潘旸, 谷军霞, 徐宾, 姜志伟, 韩帅, 朱智, 张雷, 孙帅. 2019. 多源气象数据融合格点分析产品研制进展. 气象学报, 77 (待刊):

SHI Chunxiang, PAN Yang, GU Junxia, XU Bin, JIANG Zhiwei, HAN Shuai, ZHU Zhi, ZHANG Lei, SUN Shuai. 2019. **A review of multi-source meteorological data fusion products.** *Acta Meteorologica Sinica*, 77(in press) (in Chinese)

Abstract This paper is focused on the latest products developed by National Meteorological Information Center (NMIC) of China, which including soil temperature and moisture, sea surface temperature, sea surface wind, 3-Dimension cloud information and a series of conventional meteorological surface station observation data, such as air temperature, air pressure, precipitation, radiation, humidity, wind velocity and direction. Then the multi-source data fusion testbed and integrated quality evaluation system for these products are introduced. Furthermore, the recent progresses of multi-source data fusion from both foreign and domestic are reviewed in the paper, and the future development of multi-source data fusion in meteorology is prospected.

Key words Multi-source grid products, precipitation fusion, forcing data fusion, land data assimilation, SST and SSW fusion, 3D cloud information fusion.

摘要 阐述了国内外主要的多源气象数据融合产品研究进展与趋势, 重点介绍了中国气象局国家气象信息中心研制的陆面气象要素 (包括气温、降水、湿度、风、气压、辐射等)、土壤温度与土壤湿度、洋面

批注 [pany1]: 目的

¹ 资助项目: 国家自然科学基金项目(91437220), 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201306045, GYHY201506002, GYHY201406001), 国家气象科技创新工程-“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”攻关任务资助

第一作者: 师春香, 主要从事多源数据融合与再分析, E-mail: shicx@cma.gov.cn. 电话: 010-58995153

30 温度与洋面风、三维云等多源融合格点产品研发现状, 以及国家气象信息中心多源数据融合中试平台及统
31 一质量检验评估系统的进展, 并对未来多源气象数据融合产品研制进行了展望。

批注 [pany2]: 资料 and 结果, 海陆空多要素、多源融合产品及研发现状

32 **关键词** 多源融合格点产品、降水融合、陆面气象驱动数据融合、陆面数据同化、海表气象要素融合、
33 三维云量融合

批注 [pany3]: 结论, 要在中试平台上开展多维的多源融合业务实况产品研制, 形成多源数据融合格点分析产品业务体系

34 中图法分类号 P468

35 1 引言

36 随着气象观测系统的迅猛发展, 利用地面自动站、雷达、卫星等获取的观测数据越来越
37 多, 多种数值模式模拟数据质量也在不断提高, 同时, 各行业对格点化的时空连续的气象数
38 据产品要求越来越高。利用数据融合与数据同化技术, 综合多种来源观测资料及多模式模拟
39 数据, 获得高精度、高质量、时空连续的多源数据融合气象格点产品是行之有效的。多
40 源气象数据融合研究重点是, 地面站点观测与卫星、雷达等遥感手段获取的面观测, 不同分
41 辨率面观测数据之间的时空匹配技术, 不同观测之间系统性偏差订正技术, 多源观测资料融
42 合分析技术等。国内外多源数据融合气象格点产品研究成果众多, 涉及陆面、海洋、大气多
43 个领域, 已在天气气候研究与业务、防灾减灾等应用中发挥了重要作用。

批注 [pany4]: 研究意义, 气象研究与预报业务对高质量格点产品的需求越来越迫切

44 我国多源气象数据融合研究起步相对较晚, 中国气象局(CMA)在2014年启动了国家气
45 象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”(以下简称“创新工程”),
46 其攻关任务目标之一是研制高质量的陆面、海洋与三维云雨多源数据融合产品及相关技术攻
47 关。依托创新工程, 国家气象信息中心在引进国际先进融合技术的基础上, 消化吸收并自主
48 创新, 建成了业务化的亚洲区域 CMA 陆面数据同化业务系统(CMA Land Data Assimilation
49 System, CLDAS)和中国区域 CMA 融合降水分析系统(CMA Multi-source Precipitation
50 Analysis System, CMPAS), 以及实时运行的全球海表温度产品系统(CMA Ocean Data Analysis
51 System, CODAS-SST)和中国区域三维云融合系统(3D Cloud Analysis System, 3DCloudAS)。
52 2017年中国气象局天气预报业务由原来的站点预报升级为智能网格预报业务, 一系列多源
53 数据融合产品(包括气温、降水、湿度、风、总云量、能见度等多个要素)通过优化产品时
54 效、调整网格后, 已提供智能网格预报业务应用。另外包括地面气象要素及土壤温湿度、径
55 流、蒸散发等在内的由 CLDAS 系统生产的系列产品也提供中国气象局智慧农业业务应用。

批注 [pany5]: 研究切入点, 观测手段越来越丰富, 融合技术多样, 融合产品众多, 如何在天气气候研究与业务、防灾减灾中指导应用

批注 [pany6]: 拟解决的关键技术, 在引进吸收的基础上形成业务应用能力

56 本文首先阐述了国内外主要的多源气象数据融合产品研究进展与趋势, 重点介绍国家气
57 象信息中心研制的陆面气象要素、土壤温度与土壤湿度、海洋洋面温度与洋面风、大气三维
58 云信息等多源融合格点产品研发现状, 之后介绍国家气象信息中心多源数据融合中试平台及
59 统一质量检验评估系统的进展, 最后对未来多源气象数据融合产品研制进行了展望。

批注 [pany7]: 研究进展, 建成多个业务系统, 并提供业务应用

60 2 降水融合进展

61 多源降水融合的发展起于上世纪 90 年代, 为了结合静止卫星红外探测时空间连续分辨
62 率高和极轨卫星被动微波降水精度较高的优势, 对多颗卫星不同类型探测资料反演的降水进
63 行校正和融合, 形成多卫星集成降水产品, 再采用地面观测对卫星降水的系统偏差进行订正,

64 形成最终的融合降水产品。初期由于卫星数量较少，卫星降水产品如 GPCP (Global
65 Precipitation Comperation Project) (Huffman, et al, 1997)、CMAP (Climate Prediction
66 Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation) (Xie, et al, 1997) 时空分辨率低，
67 时间序列从 1979 年开始，适合气候研究。随着卫星遥感探测技术的发展，发展了概率密度
68 函数 (PDF) 匹配等卫星资料校正及偏差订正技术，且最优插值 (OI)、卡曼滤波 (KF) 等
69 融合技术在降水融合邻域也有了更成熟广泛的应用，卫星集成及融合降水产品的时空分辨率
70 显著提高，如美国的 TMPA (TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis) (Huffman,
71 et al, 2007)、CMORPH (CPC Morphing technique) (Joyce, et al, 2004)、日本 GsMAP
72 (East Asian Multi Satellite Integrated Precipitation) (Ushio, et al, 2009) 等
73 产品的分辨率达到了逐 3 小时/0.25° 及以上，为全球大范围降水监测提供了可能。

74 但是在区域高分辨率降水监测领域雷达定量降水估测 (QPE) 产品仍是主流 (表 1)。雷
75 达探测的是与降水更加直接的结构信息，精度较卫星明显提高。针对雷达估测降水的偏差，
76 以雨量计为基准发展了基于 KF、OI、距离反比加权 (IDW) 等方法的平均场系统误差订正和
77 局部偏差订正技术 (Seo, et al, 2002)，已在美国国家环境预报中心 (NCEP) 的 StageIV
78 系统和美国国家强风暴实验室 (NSSL) 的 MRMS (Multi-Radar Multi-Sensor) 系统中成熟
79 应用。目前，美国 MRMS 产品的最高时空分辨率高达 2 分钟、1km，在强降水灾害天气监测和
80 临近预报方面有重要应用价值。

81
82 表 1 国外主要高分辨降水业务产品列表

83 Table 1 List of the main high resolution precipitation operational products in foreign

国家	机构	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起始时间	时空分辨率
美国	NCEP	StageII	地面杂波、异常回波、固定地面目标去除；零度层亮带检测；静态 ZR 关系	累积降水量	美国本土	1994 年	4km, 1 小时
	NCEP	StageIV (Kittlinger, et al, 2013)	地面雨量计偏差订正、人工质控、卫星填补	累积降水量	美国本土	2001 年	4km, 1 小时
	NSSL	MRMS (Zhang, et al, 2017)	dpQC、无缝混合扫描、波束阻挡订正、VPR 订正、降水类型分类、Mountain Mapper、基于降水类型 ZR 关系、地面雨量计局部偏差订正	降水率、累积降水量、误差	美国本土	2006 年	1km, 2 分钟更新
法国	法国气象局	业务	第 1 代	降水	单部雷达	1997 年	1km, 15 分钟
		雷达	第 2 代 (Pierre, 2007)	降水	法国组网	2007 年	1km, 5 分钟
		降水	第 3 代 (Jordi F V and Pierre T, 2013)	降水	法国组网	2013 年	1km, 5 分钟
德国	德国气象局	RADOLAN (Radar-Online-Aneichung)	地物杂波抑制、地形遮挡订正、气候态订正	降水	德国	2001 年	1km, 1 小时
澳大利亚		雷达 QPE 产品 (http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/radar_coverage_national.shtml)	去除地面杂波、海量杂波；降水类型分类；基于卡尔曼滤波方法的地面雨量计校准	累积降水量	单部雷达		6 分钟

84 与国际主流高分辨率的降水产品以雷达资料应用为主的情况不同,中国复杂地形和雷达
85 型号差异造成雷达组网的技术困难,以及如超折射、负折射、电磁干扰、海浪回波、地形遮
86 挡、地物杂波、零度层亮带、衰减、未完全充塞、扫描方式局限等雷达回波的基本质量问题
87 尚未完全解决,中国雷定 QPE 产品质量与美国相比有很大差距,如中国雷达 QPE 产品夏季的
88 相关系数(CC)不超过 0.6,均方根误差(RMSE)大于 1.3mm/h(潘昉等,2018),而美国
89 本土雷达 QPE 暖季 CC 大于 0.75, RMSE 小于 1mm/h(Wu, et al, 2012)。目前,中国区域
90 业务化的高分辨率融合降水产品多是模式预报或卫星与地面观测的融合产品。其中,国家气
91 象信息中心引进吸收美国国家海洋和大气管理局(NOAA)气候预测中心(CPC)的“PDF+OI”
92 两步融合法(Xie, et al, 2011),研制一系列逐小时/10km 地面和卫星二源降水融合产品
93 (潘昉等,2012)。2014 年,提出“PDF+贝叶斯多模型平均(BMA)+OI”方法,引入探测
94 中心的雷达 QPE 产品,研制了逐小时/5km 的地面、卫星、雷达三源融合降水产品,2016 年
95 将产品的空间分辨率提高至 1km(潘昉等,2018),2017 年面向智能网格预报业务需求研制
96 出 10 分钟、5km 分辨率的融合降水产品。

97 3 陆面数据融合进展

98 目前,国际上陆面数据融合产品主要包括陆面大气驱动场(如气温、气压、湿度、风速、
99 降水、辐射)和陆面要素融合分析(如土壤湿度、土壤温度、地表温度、地表热通量、径流、
100 积雪等)两大类产品。

101 陆面大气驱动场是陆面过程模拟的输入数据,其数据来源可以为大气再分析资料中近地
102 面要素场,同时,也可在此基础上,通过数据融合订正等技术,对再分析场进行优化,获取
103 更高质量的陆面大气驱动场。国际主流的大气驱动场数据主要包括 Sheffield 大气驱动数据
104 场、Qian 大气驱动数据和美国 GLDAS(Global Land Data Assimilation System)大气驱动
105 场数据等,其研制技术主要采用数值模式预报、卫星资料反演、多源数据融合等(Sheffield,
106 et al, 2004; Qian, et al, 2006)。三种陆面大气驱动场覆盖区域均为全球,时间分辨率
107 为 3 小时,但空间分辨率各有不同;各驱动场数据均已经开展历史数据回算,其中 Sheffield
108 大气驱动数据场、Qian 大气驱动数据已经回算到 1948 年,具有较长的时间序列,适宜开展
109 长时间的陆面模拟分析和气候评估研究等工作,GLDAS 大气驱动场作为美国 NOAA 业务产品,
110 实时向用户提供最新时次产品。

111 国外陆面要素数据融合分析产品主要来自于各业务和科研单位构建的陆面数据同化系
112 统,如欧洲 ELDAS(European Land Data Assimilation System)(Albergel, et al, 2013)、
113 美国 GLDAS(Rodell, et al, 2004)、NLDAS(North American Land Data Assimilation System)
114 (Xia, et al, 2012)、东京大学陆面数据同化系统(LDAS-UT)(Rasmy, et al, 2011)
115 等。多数陆面数据同化系统尚未真正同化陆面状态变量,仍然局限于提高陆面模式驱动数据,
116 例如 GLDAS 和 NLDAS 致力于完善反照率、土地覆盖/土地利用类型、植被绿度和叶面积指数
117 等。也有部分系统开展了同化研究及业务应用,如:ELDAS 采用 OI 和扩展卡尔曼滤波(EKF)

118 方法,可同时同化 2M 温度和湿度以及微波亮温资料。总体来看,尽管陆面数据同化是当前
119 的一个研究热点,但在业务天气预报模式中的应用仍处于初步阶段。

120 美国 NCEP 准业务运行的 NLDAS 系统虽然没有真正同化陆面状态变量,但是已在美国干
121 旱监测等领域发挥了重要的作用。NLDAS 下一阶段的目标是引入最新版本的 LIS (Land
122 Information System) 系统(可灵活使用的陆面同化系统,包含了集合卡尔曼滤波(EnKF)
123 算法、多陆面模式集合预报的土壤湿度/积雪/温度等),真正实现业务化的陆面模式的同化,
124 陆面要素产品的空间分辨率将达到 3.125km。美国国家大气研究中心(NCAR)也已开展了 4km
125 尺度的高分辨率陆面数据同化(HRLDAS)研究(Zeeberg, et al, 2007),通过同化观测数
126 据,使陆面模式为天气研究预报模式(WRF)提供高质量、高时空分辨率状态变量。

127 我国陆面数据融合研究起步相对较晚,但发展较快。表 2 给出了中国主要陆面数据产品。
128 其中,国家气象信息中心研发的 CMA 陆面数据同化系统第一版本(CLDAS-V1.0)于 2013 年
129 率先在中国实现了国家级陆面要素产品的业务化生产和发布,重点解决了东亚(尤其是中国)
130 区域陆面大气驱动场的多源融合技术难题。引进和改进美国 NOAA 地球系统研究实验室(ESRL)
131 的多重网格变分(STMAS)分析,改进国家卫星气象中心业务算法,基于离散坐标法物理模
132 型(Hybrid)的短波辐射遥感反演(刘军建等, 2017),采用基于“PDF+OI”的融合降水,
133 发展基于 CLM3.5、CoLM、Noah-MP(4 套参数化方案)多陆面模式集合模拟技术,于 2015
134 年研制了 CLDAS-V2.0,实时发布亚洲区域逐小时和逐日/0.0625° 的大气驱动场和陆面要素
135 集合分析产品。同时,在 CLDAS-V2.0 关键技术研发基础上,高分辨率 CMA 陆面数据同化系
136 统第一版本(HRCLDAS-V1.0)投入试运行,产品分辨率提高至 1km(韩帅等, 2018)。与国
137 内外同类产品比较分析结果表明,CLDAS 系列大气驱动场产品、陆面要素融合分析产品在
138 中国区域的时空分辨率和质量更高(韩帅等, 2017; 孙帅等, 2017)。2017 年底国家气象信
139 息中心研制完成了 CLDAS-V3.0 业务系统,实现了我国 FY3C 卫星反演土壤湿度资料同化、地
140 表温度同化、以及地表温度与微波亮温资料协同同化,开展了 FY-3 积雪覆盖率以及雪深资
141 料在中国区域的同化应用研究,使得积雪同化的效果得到了改善,并对青藏高原积雪变量
142 模拟起到了改进的作用(张帅等, 2018; 师春香等, 2018)

143 表 2 中国主要陆面数据融合产品

144 Table 2 The main land surface elements merging products in China

机构	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起止时间	时空分辨率	下载地址
国家气象信息中心	CLDAS 陆面数据同化产品	多重网格变分; 空间格点拼接、离散纵坐标短波辐射遥感反演; CLM、Noah-MP、CoLM 多陆面模式集合模拟	气温、气压、湿度、风速、降水、短波辐射、土壤湿度、土壤温度、地表温度、土壤相对湿度	亚洲	2008-	1h/0.0625°	中国气象数据网 (http://data.cma.cn/)
国家气象信息中心	HRCLDAS 高分辨率陆面数据同化产品	多重网格变分; 离散纵坐标短波辐射遥感反演和融合、多卫星集成降水融合; CLM 陆面模式模拟	气温、气压、湿度、U/V 风、风速、降水、短波辐射、土壤湿度、土壤温度、地表温度、土壤相对湿度	中国	2015-	1h/0.01°	全国综合气象信息共享平台(CIMISS)
中科院寒旱所	中国西部陆面数据同化产品	陆面模式模拟	土壤水分、土壤温度、积雪、冻土	中国西部	2002-	3h/0.25°	寒区旱区科学数据中心
中科院青藏高原研	中国区域地面气象要素驱动	双线性空间插值; 播版样条插值; Hybrid	气温、气压、湿度、风速、降水、太阳辐射	中国	1981-2008	3h/0.1°	http://w

究所	数据集	Model 辐射估算	estdc. we stgis. ac .cn/
----	-----	------------	--------------------------------

145

146 4 海表要素融合进展

147 海表要素的融合思路和技术与降水的融合类似，采用实测数据订正多卫星反演要素，再
148 将卫星反演与船舶、浮标等实测数据融合，而诸如泊松松弛法、OI、PDF、二维变分等偏差
149 订正和融合技术的应用也较降水更早更成熟。目前，海表要素融合研究主要集中在海表温度
150 (SST)、洋面风、海冰等融合产品的研发。

151 SST 是全球海洋大气系统中最为重要和基础的海洋要素之一，各国研究机构和业务部门
152 已不断研制出了高质量的 SST 融合产品（表 3），如逐月的哈德来中心海冰和海温产品
153 (HadISST) (Rayner, et al, 2003)、逐日/0.25° 的 OISST (Optimum Interpolation Sea
154 Surface Temperature) (Reynolds, et al, 2002) 以及逐日 1/12° 的 RTG-HR (Real-time,
155 global, sea surface temperature analysis) (Gemmill, et al, 2007) 等。最近，英国
156 气象局基于 GHRSSST-PP (Group for High Resolution Sea Surface Temperature Pilot
157 Project) 计划提供的多卫星数据和实测数据，研制了 0.05° 的全球逐日海温融合产品 OSTIA
158 (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) (Donlon, et al, 2012)。

159

160

表 3 国外主要海表温度融合产品列表

161

Table 3 List of the main sea surface temperature merging products in foreign

国家	机构	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起始时间	时空分辨率	下载网址
		OISST (NOAA)	Poisson 方法校正卫星资料大尺度偏差, 最优插值方法融合	海表温度	全球	1981 年	1° / 周 1° / 月	https://www.ncdc.noaa.gov/oisst
		OISST V2.0 (NOAA)	月平均资料由周资料线性插值得到该月每日值, 再经累计得到	海表温度	全球	1981 年	0.25° / 日	
美国	NOAA	RTG-HR (NOAA)	二维变分方法	海表温度	全球	2005 年	0.5° - 1/12° / 日	http://polar.ncep.noaa.gov/sst/rtg_high_res/
		MPM SST (NOAA)	PDF 订正卫星资料误差+OI 融合	海表温度	西半球	2006 年	0.25° / 3 小时	https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html
英国	Hadley Center	HADISST1	两步约化空间最优插值 (RSOI), 叠加高质量的格点观测 (RDB)	海表温度 海冰覆盖度	全球	1870 年	1° / 月	http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.html
		OSTIA	多尺度 OI 技术	海表温度	全球	2006 年	0.05° / 日	https://www.ncdc.noaa.gov/oisst

162

163 海冰的高反照率和隔绝海—气热量和动量交换作用对区域乃至全球气候变化均有重要
164 的调节作用。HadISST 是国际上应用最为广泛的全球海冰密集度融合资料之一 (Rayner, et
165 al, 2003)，利用数字化图表订正微波数据，保证了融合产品的均一性。还有一些区域的海

166 冰融合资料, 如美国的 IMS (the interactive multisensor snow and ice mapping system)
167 (Ramsay, 2000)和 MASIE(Multisensor Analyzed Sea Ice Extent project for the Northern
168 Hemisphere) (Fetterer, 2006) 北半球逐日海冰覆盖资料, 也常用于天气气候实时监测业
169 务。

170 洋面风场影响大气与海洋之间的相互作用, 以及船只航行、海上工程等活动。国际上应
171 用较多的洋面风融合有 CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind)
172 (Atlas, et al, 2011) 和 BSW (Blended Sea Winds) (Zhang, et al, 2006a; 2006b)。
173 王际朝 (2014) 也分别以 QSCAT (QuikSCAT satellite) /NCEP 和 CCMP 再分析风场为背景
174 场, 利用 OI 方法对研究区域内浮标的风速和风向进行融合。

175 国内也开展了相关研究, 国家海洋环境预报中心在西北太平洋海域利用 OI 方法将船舶
176 报资料和全球海洋观测网 (ARGO) 海温数据同化到数值模拟中, 有效地改进了三维海温模拟
177 的结果 (李云等, 2008)。中科院大气物理所的全球海洋资料同化系统 (ZFL_GODAS) 能够
178 同化多类型观测资料包括卫星高度计资料、卫星 SST 资料, 以及 ARGO、投弃式温度剖面测
179 量系统 (XBT)、热带大气海洋观测阵列 (TAO) 等各种不同来源的现场温盐廓线资料 (路泽廷
180 等, 2014)。但是, 目前业务工作中所使用到的海洋 SST、海冰和洋面风资料主要依靠国外
181 卫星及融合产品。国家气象信息中心 2016 年采用 STMAS 方法实现了中国风云 3B 卫星 (FY-3B)、
182 日本全球变化观测任务卫星 (GCOM-W1)、欧洲气象业务化卫星 (MetOP-B) 等卫星反演海温
183 产品与浮标、船舶观测海表温度与欧洲中心 (ECMWF) 精细化预报海温产品的融合, 能够更
184 好地反映出台风路径上的海表温度变化 (徐宾等, 2018), 基于此方法建设的全球海表温度
185 融合分析系统于 2018 年底实现了业务化运行。同时, 信息中心还开展了欧洲气象卫星应用
186 组织 (EUMETSAT/OSI-SAF) 制作的全球海冰密集度分析日产品、美国 NISE (Near-Real-Time
187 SSM/I EASE-Grid Daily Global Ice Concentration and Snow) 产品、风云卫星微波成像
188 仪 (MWRI)、IMS 等海冰覆盖度产品的全球多卫星海冰覆盖度融合试验。

189 5 三维云融合进展

190 美国 NOAA/ESRL 发展了局地分析预报系统 (LAPS), 能够通过融合数值预报产品、地面、
191 探空、雷达、静止气象卫星、GPS/MET、风廓线雷达、飞机等多源观测数据, 获得三维云融
192 合格点数据, 为数值预报模式提供更好的初始场, 改进数值预报模式的短期预报水平。其他
193 一些机构也发展了类似的三维云融合系统, 例如美国的 ARPS (Advanced Regional
194 Prediction System)、RUC (Rapid Update Cycle)、奥地利的 INCA (Integrated Nowcasting
195 through Comprehensive Analysis) 等 (表 4)。近年来, 美国通过在目前的业务同化系统
196 (GSI) 中嵌入 ARPS 和 RUC, 研发了 GSI-Cloud 云分析模块, 实现了云分析的功能, 可以为
197 数值预报模式提供包含更高精度云信息的初始场, 意味着三维云融合将成为同化系统的重要
198 模块。

199 表 4 国外三维云融合系统概况

200 Table 4 The overview of three-dimensional cloud merging system in foreign

国家	研发机构	系统名称	系统介绍
美国	NOAA/ESRL	LAPS	LAPS 系统能够将多种观测数据（气象地面观测网、雷达、卫星、垂直探测器、飞机等）进行融合分析，得到高分辨率的三维分析结果（Albers, et al, 2013）
美国	俄克拉荷马大学/风暴分析和预测中心	ARPS	ARPS 的云分析模块主要从 LAPS 发展而来，也采用了逐步订正的方法进行三维云分析（Xue, et al, 2001; Wang, et al, 2003; 朱立娟等, 2017）
美国	NOAA/ESRL	RUC	云分析模块采用了逐步订正的方法（Benjamin, et al, 2015）
美国	俄克拉荷马大学/风暴分析和预测中心	GSI-Cloud	结合了 RUC 和 ARPS 的优势，通过融合卫星的云产品、地面云观测、雷达和闪电定位等资料，形成较为准确的三维云融合产品，并应用于北美快速天气模拟业务中（尚未调用）。
	NOAA/ESRL/全球系统部		通过融合数值预报产品、卫星、雷达和地面观测数据，并结合精细化下垫面信息，对数值预报产品进行订正后，形成高分辨率的分析场与外推预报场；每 15 分钟计算一次（Haiden, et al, 2011）
奥地利	奥地利国家气象局	INCA	

201

202 国内在三维云融合方面也开展了一些研究工作，主要是引进国外的融合系统，并基于国内的业务环境开展本地化研发（表 5），如国家卫星气象中心基于中国区域业务环境搭建的
203 三维云信息融合分析系统。国家气象信息中心也针对中国区域特征以及中国现有资料特点，
204 基于 LAPS 系统和全国综合气象信息共享平台（CIMISS）数据环境，建成了适用于中国区域
205 的 3DCloudAS 系统，实现了中国区域的地面观测、机场观测、探空观测、飞机观测、风云-2G/
206 葵花-8 静止气象卫星、多普勒雷达、风廓线雷达等多种观测资料的融合，该系统于 2018 年
207 实现业务运行，可实时逐小时输出三维云量，以及三维温度场、湿度场、风场等的网格化产
208 品，空间覆盖为中国区域，空间分辨率为 0.025°（重点区域 0.001°）。

210

表 5 国内三维云融合系统概况

211

Table 5 The overview of three-dimensional cloud merging system in China

机构	系统平台	区域	系统介绍
上海市气象局	LAPS	华东	引进并业务化，能够融合自动站、雷达径向风和回波、风云卫星云图等资料（刘东等, 2012）
武汉暴雨所	LAPS	华中	根据本地探测资料的种类和特点开展了 LAPS 本地化移植及二次开发（李红莉等, 2009）
北京市气象局	LAPS	北京	能够融合雷达、卫星云导风、常规探空及自动站等资料（高华等, 2009）
国家卫星气象中心	LAPS	中国	搭建三维云信息融合分析系统，可生成集多颗卫星、多部雷达、地面常规和非常规等多种观测资料优势为一体的三维大气信息产品（刘瑞霞等, 2013）
中国气象局公共气象服务中心	LAPS	中国	引进并业务化，使用 GRAPES-Meso 预报场作为背景场，融合风云卫星、葵花卫星、探空、地面、多普勒雷达等多种资料，产生每小时一次的三维分析场（李超等, 2017）
国家气象信息中心	LAPS	中国	建成三维云融合业务系统，能够融合包括地面、探空、雷达、GPS/MET、风云-2G 卫星、葵花-8 卫星等多种观测资料，实时生成三维大气融合格点产品与三维云融合格点产品

212

213 6 多源数据融合中试平台设计

214 中试平台是完善气象科技成果转化应用体制机制、推动气象科技成果转化应用重要途径。
215 多源数据融合中试平台的设计目的即推动多源数据融合关键技术快速地转换为业务应用能力。
216 力。

217 多源数据融合中试平台作为气象信息中试基地的有机组成部分，在其框架下，发展适用于
218 于多源数据融合科研成果迅速转化为业务的中试平台，主要用于实现多源数据融合产品研发
219 和业务转化。中试平台主要包括：依托气象信息中试基地提供的软硬件环境及数据环境，构
220 建多源数据融合的资源环境；打造包括降水融合分析、陆面数据融合同化、海表要素融合、
221 三维云三维大气融合等多源数据融合分析功能于一体的中试系统环境；重点研发融合格点实

222 况产品检验评估的统一规范，开发评估工具；建立统一的准入规则、中试系统开发、检验评
223 估、业务转化流程等规范。

224 7 未来发展

225 多源数据融合合格点分析中需要解决的科学问题主要集中在以下两个方面：

226 第一，融合分析的时空尺度代表性问题，即在不同观测数据条件，如空间上站网稀密变
227 化、时间上观测频次的增减等，以及在不同地形条件、不同气候背景、不同天气系统条件下
228 如何合理制定多源融合合格点分析产品时空分辨率，从而得到最优分析尺度上时序列一致的多
229 源融合产品。如青藏高原典型区域，站点稀疏且受高大地形、积雪覆盖、复杂下垫面条件等
230 多种因素影响，成为融合分析中的难点。

231 第二，由于多源数据融合合格点分析产品常常被用来对数值预报产品等进行检验评估，以
232 及在智能网格气象预报业务中被作为实况产品应用，因而如何对融合数据的“真实性”进行
233 评判，需要利用多源协同观测和设计外场科学试验进行独立检验，并建设多源数据融合合格点
234 分析产品质量评价体系以及其可视作真值的质量标准。

235 在多源数据融合合格点分析产品研制中，一些关键的技术问题尚需要深入研究。包括地面、
236 探空、卫星、雷达、模式等多种来源资料的协同质量控制，针对不同气候背景、复杂地形、
237 下垫面条件下各来源资料的误差分析及偏差订正技术，STMAS、OI、EnKF、Hybrid 等方
238 法的局地优化应用技术。引进机器学习、大数据挖掘等人工智能方法在降水、陆面、海洋以
239 及三维云融合中应用也是值得探索的研究内容。

240 未来，将在多源数据融合科学问题与关键技术研究基础上，在业务单位形成多源数据融
241 合格点分析产品业务体系，如图 1 中是目前国家气象信息中心多源数据融合多个业务系统成
242 熟度及产品特性。在保证产品质量同时，产品空间分辨率由现在的公里级提高到米级，时间
243 分辨率由小时提高到分钟级，产品时效逐步提高到分钟级，产品覆盖范围从中国扩展到全球
244 （重点是一带一路区域）。同时对历史数据进行回算，建成长时间序列的多源数据融合合格点
245 分析产品数据集，提供应用。

成熟度

业务应用阶段	长序列数据集				10年				10年	10年								
业务运行阶段	产品推广																	
业务运行阶段	运行																	
业务运行阶段	试运行																	
业务转化阶段	业务系统																	
业务转化阶段	原型系统																	
业务转化阶段	关键技术																	
研发阶段	实施方案																	
系统名称		CMPAS				CLDAS				3DCloudA		CODAS						
产品特性	要素	降水	降水	降水	降水	温压湿风	温压湿风 能见度	温压湿风	土壤温湿度	三维云	总云量	海冰	洋面风	海温				
	区域范围	全球	中国			全球	中国	亚洲		中国		全球						
	空间分辨率	10km	5km	5km	10km	10km	5km	6.25km	6.25km	2.5km	5km	25km						
	时间分辨率	3h	10min	1h	1h	3h	1h	1h	1h	1h	1h	1d	6h	1d				

业务系统及产品特性

智能网格预报业务应用

■ 降水 ■ 陆面 ■ 三维云 ■ 海表要素

246

247

图 1 国家气象信息中心多源数据融合业务系统成熟度及产品特性

248

Fig.1 The maturity of multi-source data merging business system and product characteristics of NMIC

249

250

参考文献

252

高华, 谭旭光, 李英华等. 2009. 局地分析和预报系统(LAPS)在北京市气象局移植与应用// 中国气象学会年会. Gao Hua, Tan Xuguang, Li Yinghua, et al. Transplantation and application of local analysis and prediction system(LAPS) in Beijing meteorological administration[C]// Annual meeting of the China Meteorological Society. 2009. (in Chinese)

256

韩帅, 师春香, 姜立鹏等. 2017. CLDAS 土壤湿度模拟结果及评估. 应用气象学报, 28(3):369-378. Han S, Shi C X, Jiang L, et al. The Simulation and Evaluation of Soil Moisture Based on CLDAS[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(3):369-378. (in Chinese)

259

韩帅, 师春香, 姜志伟等. 2018. CMA 高分辨率陆面数据同化系统 (HRCLDAS-V1.0) 研发及进展. 气象科技进展, 8(1):102-108. Han S, Shi C X, Jiang Z W, et al. Development and progress of high resolution CMA land surface data assimilation system[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(1):102-108. (in Chinese)

263

李超, 唐千红, 陈宇等. 2017. 多源数据融合系统 LAPS 的研究进展及其在实况数据服务中的应用. 气象科技进展, 7(2):32-38. Li Chao, Tang Qian-hong, Chen Yu, et al. An overview of progresses in LAPS and prospective applications in real time data service [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2017, 7(2):32-38. (in Chinese)

267

李红莉, 崔春光, 王志斌. 2009. LAPS 的设计原理、模块功能与产品应用. 暴雨灾害, 28(1):64-70. Li Hong-li, Cui Chun-Guang, Wang Zhi-bin. Scientific designs, functions and applications of LAPS [J]. Torrential Rain and Disasters, 2009, 28(1):64-70. (in Chinese)

270

李云, 刘钦政, 张建华等. 2008. 最优插值方法在西北太平洋海温同化中的应用研究. 海洋预报, 25(2):25-32. Li Y, Liu Q Z, Zhang J H, et al. Optimal interpolation and its application to assimilation of sea temperature in northwest Pacific region[J]. MARINE FORECASTS, 2008, 25(2):25-32. (in Chinese)

272

273 刘军建, 师春香, 贾炳浩等. 2018. FY-2E 地面太阳辐射反演及数据集评估, 遥感信息, 33(01): 104-110. Liu
274 J, Shi C, Jia B, et al. Retrievals and evaluation of downward surface solar radiation derived from FY-2E [J].
275 Remote Sensing Information, 2018. 33(01): 104-110. (in Chinese)

276 刘瑞霞, 徐祥德, 刘玉洁. 2013. JICA 综合观测与卫星数据在高原地区三维云和水汽场构建中的应用. 高原
277 气象, 32(6):1589-1596. Liu R X, Xu X D, Liu Y J. Application of JICA comprehensive observation and
278 satellite data in three-dimensional cloud and humidity construction over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau
279 Meteorology, 2013, 32(6):1589-1596. (in Chinese)

280 刘寿东, 唐玉琪, 邵玲玲等. 2012. LAPS 分析场在一次强对流天气过程尺度分析中的应用. 大气科学学报,
281 35(4):391-403. Liu Shou-dong, Tang Yu-qi, Shao Ling-ling, et al. The application of LAPS products in
282 mesoscale analysis of a severe storm [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(4) : 391-403. (in
283 Chinese)

284 路泽廷, 朱江, 符伟伟等. 2014. 全球海洋资料同化系统 ZFL_GODAS 的研制和初步评估试验. 气候与环境
285 研究, 19(3): 321-331. Lu Z, Zhu J, Fu W W, et al. Design and preliminary evaluation of the global ocean data
286 assimilation system ZFL_GODAS [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(3): 321-331. (in
287 Chinese)

288 潘昶, 沈艳, 宇婧婧等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验,
289 气象学报, 70 (6) : 1381-1389. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly
290 precipitation over China based on the OI technique [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(6):1381-1389. (in
291 Chinese)

292 潘昶, 谷军霞, 宇婧婧等. 2018. 中国区域高分辨率多源融合降水观测产品的融合方法试验. 气象学报,
293 76(5):755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al. Test of merging methods for multi-source observed precipitation at
294 high resolution over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(5):755-766. (in Chinese)

295 师春香, 张帅, 孙帅等. 2018. 改进的 CLDAS 降水驱动对中国区域积雪模拟的影响评估. 气象, 44 (8) :
296 985-997. Shi C X, Zhang S, Sun S, et al. Effect of improved precipitation CLDAS on snow simulation in China.
297 Meteorological Monthly, 2018, 44(8):985-997. (in Chinese)

298 孙帅, 师春香, 梁晓等. 2017. 不同陆面模式对我国地表温度模拟的适用性评估. 应用气象学报, 28(6):
299 737-749. Sun S, Shi C X, Liang X, et al. Assessment of ground temperature simulation in China by different
300 land surface models based on station observations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017,
301 28(6):737-749. (in Chinese)

302 王际朝. 2014. 基于风场和海浪同步观测的海浪同化模式构建[D].中国科学院研究生院(海洋研究所), Wang
303 J C. Building of Wave Assimilation Model Based on the Synchronous Observations of Wind and Wave [D].
304 Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

305 徐宾, 宇婧婧, 张雷等. 2018. 全球海表温度融合研究进展. 气象科技进展, 8(1):164-170. Xu B, Yu J J, Zhang
306 L, et al. Research progress of global sea surface temperature fusion [J]. Advances in Meteorological Science
307 and Technology, 2018, 8(1):164-170.(in Chinese)

308 张帅, 师春香, 梁晓等.2018.风云三号积雪覆盖产品评估, 遥感技术与应用.2018, 33(1): 35-46. Zhang S, Shi C
309 X, Liang X, et al. Assessment of FY-3 snow cover product. Remote Sensing Technology and Application,
310 2018, 33(1): 35-46. (in Chinese)

311 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍等. 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用. 应用气象学报,
312 28(1):38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al. Three-dimensional cloud initial field created and applied to
313 GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017,
314 28(1):38-51. (in Chinese)

315 Albergel C, et al. 2013. Monitoring multi-decadal satellite earth observation of
316 soil moisture products through land surface reanalyses. Remote Sensing of

317 Environment, 138: 77–89

318 Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. 2011. A cross-calibrated, multiplatform
319 ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic
320 applications. *Bull Amer Meteor Soc*, 92:157–174

321 Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2015. A north American hourly
322 assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh. *Monthly Weather Review*,
323 144(4):1669–1694

324 Donlon C J, Martin M, Stark J, et al. 2012. The operational sea surface temperature
325 and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, 116: 140–158

326 Fetterer F. 2006. A selection of documentation related to National Ice Center sea
327 ice charts in digital format, NSIDC Special Report 13. Boulder, CO, USA: National
328 Snow and Ice Data Center

329 Gemmill W, Katz K, Li X. 2007. Daily real-time global sea surface temperature -
330 high resolution analysis at NOAA/NWS/NCEP/MMAB Office Note, 260, 39

331 Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al. 2011. The integrated nowcasting through
332 comprehensive analysis (INCA) system and its validation over the eastern Alpine
333 region. *Weather and Forecasting*, 26(2):166–183

334 Hu M, Xue M. 2007. Implementation and evaluation of cloud analysis with WSR - 88D
335 reflectivity data for GSI and WRF-ARW. *Geophysical Research Letters*,
336 34(340):248–265

337 Huffman G J, Adler R F, Arkin P A, et al. 1997. The global precipitation climatology
338 project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 78:5–20

339 Huffman G J, Alder R F, Bolvin D T, et al. 2007. The TRMM multisatellite precipitation
340 analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation
341 estimates at fine scales. *J of Hydro*, 8:38–55

342 Jordi F V, Pierre T. 2013. The new French operational polarimetric radar rainfall
343 rate product. *J of Applied Meteorology and Climatology*, 52(8):1817–1835

344 Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, Xie P. 2004. CMORPH: a method that produces global
345 precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial
346 and temporal resolution. *J of Hydro*, 5:487–503

347 Kitzmiller D, Miller D, Fulton R, Ding F. 2013. Radar and multisensor precipitation
348 estimation techniques in national weather service hydrologic operations. *J*
349 *Hydrol Eng*, 18(2):133–142

350 Pierre T. 2007. The new French operational radar rainfall product. part I:
351 methodology. *Weather and Forecasting*, 22:393–408

352 Qian T, et al. 2006. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004.
353 part I: forcing data and evaluations. *J of Hydro*, 7(5): 953–975

354 Ramsay B H. 2000. Prospects for the interactive multisensor snow and ice mapping
355 system (IMS). 57th Eastern Snow Conference, Syracuse, NY: ramsayECS57.

356 Rasmy M, Koike T, Boussetta S, et al. 2011. Development of a system for

357 satellite based land data assimilation coupled with an atmospheric model. IEEE
358 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Doi:10.1109/TGRS.2011.2112667
359 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface
360 temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth
361 century. *J Geophys Res*, 108(D14): 4407. Doi:10.1029/2002jd002670
362 Reynolds R W, N A Rayner, T M Smith, D C Stokes, W Wang. 2002. An improved in situ
363 and satellite SST analysis for climate. *J Clim*, 15:1609-1625
364 Rodell M, et al. 2004. The global land data assimilation system. *Bull Amer Meteor*
365 *Soci*, 85(3):381-394
366 Seo D J, Breidenbach J. 2002. Real-time correction of spatial nonuniform bias in radar
367 rainfall data using rain gauge measurements. *J Hydro Meteor*, 3:93-111
368 Sheffield J, Ziegler A D, Wood E F, Chen Y. 2004. Correction of the high-latitude
369 rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological
370 modeling. *J Clim*, 17:3814-3828
371 Ushio T, et al. 2009. A Kalman filter approach to the global satellite mapping of
372 precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric
373 data. *J of the Meteor Soci of Japan Ser II*, 87A:137-151
374 Wang D, Gao J, Brewster K, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS),
375 storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteorology and*
376 *Atmospheric Physics*, 82(1):139-170
377 Wu W, Kitzmiller D, Wu S. 2012. Evaluation of radar precipitation estimates from
378 the national mosaic and multisensor quantitative precipitation estimation system
379 and the WSD-88D precipitation processing system over the conterminous United
380 States. *J Hydro Meteor*, 13:1080-1093
381 Xia Y, et al. 2012. Continental-scale water and energy flux analysis and validation
382 for north American land data assimilation system project phase 2 (NLDAS-2): 2.
383 Validation of model-simulated streamflow. *J Geophys Res*, 117(D3),
384 doi:10.1029/2011JD016051
385 Xie P, Arkin P A. 1997. Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on
386 gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer*
387 *Meteor Soc*, 78(11):2539-2558
388 Xie P, Xiong A. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge -
389 satellite merged precipitation analyses. *J Geophys Res*, 116:D21106,
390 doi:10.1029/2011JD016118
391 Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2001. The advanced regional prediction system
392 (ARPS) - a multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction
393 tool. Part II: Model physics and applications. *Meteorology and Atmospheric*
394 *Physics*, 76(3):143-165
395 Zeeberg B, J Cheek and M. 2007. Caplow, description and evaluation of the
396 characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system. *J appl*
397 *meteor climatol*, 46(6):694-713
398 Zhang H M, Bates J J, Reynolds R W. 2006a: Assessment of composite global sampling:
399 Sea surface wind speed, *Geophysical Research Letters*, 33, L17714.
400 Zhang H M, Reynolds R W, Bates J G, 2006b: Blended and gridded high resolution global

401 sea surface wind speed and climatology from multiple satellites: 1987 - present,
402 14th Conf on Satellite Meteorology and Oceanography. Atlanta, GA: American
403 Meteorological Society, Paper 100004.
404 Zhang J, Howard K, Langston C, et al. 2016. Multi-radar multi-sensor (MRMS)
405 quantitative precipitation estimation: initial operating capabilities. Bull
406 Amer Meteor Soc, DOI:10.1175/BAMS-D-14-00174.1621-637

气象学报 待刊